蝎虎天体 PKS 0735+178 的光变特性分析

余莲，张雄，王文广，罗双玲
（云南师范大学物理与电子信息学院，云南 昆明 650500）

摘要：在收集大量数据的基础上，用时间补偿离散傅里叶变换、Jurkevich 方法和离散相关分析法分析了 PKS 0735+178 的 B 波段和 V 波段光变周期，发现该天体具有 (4.33 ± 0.41) 年的光变周期，其中心黑洞质量的下限为 $0.22\times10^{6}M_{\odot}$。

关键词：PKS 0735+178；DCDFT 方法；Jurkevich 方法；DCF 方法；光变周期；黑洞质量

中图分类号：P1　　文献标识码:A　　文章编号:1672-7673

BL Lac 天体是活动星系核中一个重要的子类，BL Lac 天体在观测上表现出高光度、高偏振、快速光变以及非热辐射等特征[1-2]，BL Lac 天体具有长周期光变和短时标光变[3-5]，通过观测和研究 BL Lac 天体不同的光变时标能获得天体的中心黑洞质量、辐射区域及内部结构参数等[6-7]。因此，研究该天体的光变周期非常重要。

BL Lac 天体 PKS 0735+178 是一颗红移为 0.424 的耀变体[8]，它具有平射电谱和射电爆、剧烈的光变、高偏振及超光速运动等性质[9]，不发出或仅发出微弱和间断的发射线[10]. 众所周知，分析 PKS 0735+178 光变周期的方法很多，但是有些方法误差极大，对观测数据的连续性有极高的要求，并不适合周期性研究，而 BL Lac 型天体由于观测特征表明无发射线[1]，要通过光谱观测获取光谱线，并用其研究中心黑洞质量等内部结构参数是不可能的[2-3]。本文主要使用时间补偿离散傅里叶变换、离散相关分析法和 Jurkevich3 种方法对 B 波段和 V 波段的光变周期进行研究，并对比分析这 3 种方法，其中时间补偿离散傅里叶变换和离散相关分析法是初次用于研究 PKS 0735+178 的光变周期，这两种方法对观测数据的连续性要求低、结果准确，而 Jurkevich 方法在文[9]中用过，并且它要求观测数据的时间序列长、连续性强。

1 样本和光变曲线

本文研究的数据从文[11-18]获取，收集从 1970 年到 2002 年期间 PKS 0735+178 光学 B 波段和 V 波段的观测数据。图 1 和图 2 分别为 B 波段和 V 波段的光变曲线。从光变曲线可以看出：PKS 0735+178 在光学波段活动非常激烈，在近 30 年的观测中，B、V 波段的最大变化近 3.5 个星等，由于受观测条件的限制，光变曲线数据不连续，V 波段将近 9 年没有数据，使周期性分析受到限制。

---

*基金项目：国家自然科学基金（11663009）资助；云南省高校高能天体物理重点实验室资助.

作者简介：余莲，女，硕士研究生.研究方向：活动星系核.Email:1261773081@qq.com.

通讯作者：张雄，男，教授.研究方向：活动星系核.Email:ynzx@yeah.net

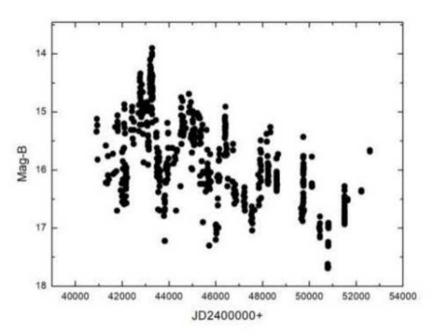


图 1 PKS 0735+178 在 B 波段的光变曲线

Fig.1 The light curve of quasar PKS 0735+178 in B band

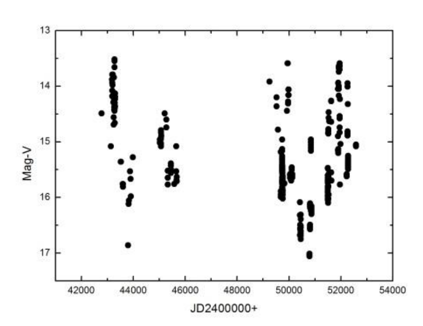


图 2 PKS 0735+178 在 V 波段的光变曲线

Fig.2 The light curve of quasar PKS 0735+178 in V band

2 周期分析

2.1 时间补偿离散傅里叶变换分析 PKS 0735+178 的光变周期

时间补偿离散傅里叶变换方法是计算光变周期最常用的方法之一，文[19]用该方法分析 PKS 1510-089 红外光变周期,通过对1、$\sin\omega t$、$\cos\omega t$作 Gram-Schmidt 正交化，得到 3 个正交向量，将数据投影到 3 个正交向量上就得到了频谱：

$$H_0 = 1 \quad , \tag{1}$$

$$H_1 = \cos\omega t \quad , \tag{2}$$

$$H_2 = \sin\omega t \quad . \tag{3}$$

正交化后：

$$h_0 = a_0 H_0 \quad , \tag{4}$$

$$h_1 = a_1 H_1 - a_1 a_0 (h_0, H_1) \quad , \tag{5}$$

$$h_2 = a_2 H_2 - a_2 a_0 (h_0, H_2) - a_2 a_1 (h_1, H_2) \quad . \tag{6}$$

对于均匀采样的数据，这个过程对应于用三维“正弦+常数”模型进行曲线拟合。如果周期大于采样时间，且时间序列足够长，覆盖所有的相位，则有

$$(H_1, H_1) \cong (H_2, H_2) \cong \frac{1}{2} a_0^2 = \frac{N}{2} \quad , \tag{7}$$

功率谱强度为： $I(\omega) = 2a_0^2 \|F(\omega)\| = c_1^2 + c_2^2$ （8）

其中, $F(\omega)$为离散傅立叶变换的功率谱。在不均匀采样的情况下，$F(\omega)$是加权的时间补偿离散傅立叶变换：

$$F(\omega) = (f, h_1 + ih_2) / a_0\sqrt{2} \tag{9}$$

在许多蝎虎天体的观测中，观测数据 $f(t_i)$ 的精度各不相同。考虑到这个问题，引进权重方程 $\omega_i = \omega_{(t_i)}$ 重新定义内积：

$$(g_1, g_2) = \sum \omega_i g_1(t_i) g_2(t_i) \qquad (10)$$

频率 ω 处的强度由下式给出：

$$I(\omega) = c_1^2 + c_2^2 \qquad (11)$$

由线性回归理论可知，$0 \le I(\omega) \le Q$，其中 $Q = (f, f) = \sum \omega_i f(t_i)^2$。利用这一性质，引进标准化因子：统计量 $S(\omega) = I(\omega)/Q$，称这一量为谱相关系数，对于所有频率 ω，$0 \le S(\omega) \le 1$。

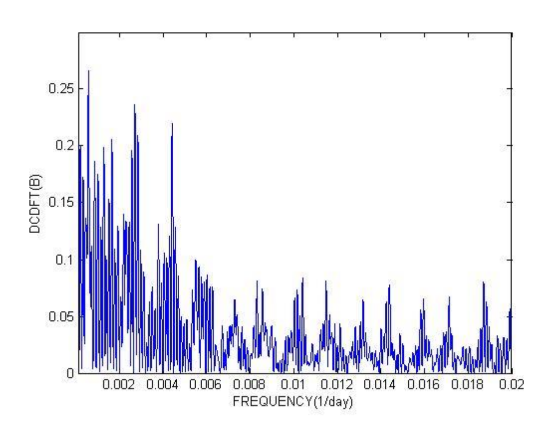


图 3 DCDFT 法分析 PKS 0735+178 的 B 波段周期

Fig.3 DCDFT method analysis the variability period of PKS 0735+178 in B band

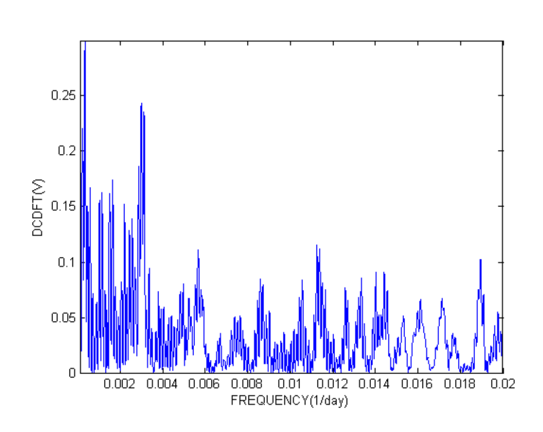


图 4 DCDFT 法分析 PKS 0735+178 的 V 波段周期

Fig.4 DCDFT method analysis the variability period of PKS 0735+178 in V band

应用上述方法获得 PKS 0735+178 的 B 波段和 V 波段周期图，由图 3、图 4 可知，B 波段存在 0.62 年、1.01 年、1.67 年、4.72 年的光变周期信息，V 波段存在 0.58 年、1.07 年、1.67 年 4.72 年的光变周期信息，按文[19]中的判据，B 波段存在 1.01 年和 V 波段存在 1.07 年光变周期信息的可靠性最大，而 B 和 V 波段存在 4,72 年次之.但考虑到平均时标为 (1.11 ± 0.01) 年的周期很可能是由于地球绕太阳所致，则光变周期 B 波段为 4.72 年，V 波段为 4.72 年.

2.2 Jurkevich 分析周期

Jurkevich 基于对天文测量中的非均匀测量问题提出的一种统计法[20]，如果观测样本数据为 N 个，X_i 为单次测量值，$\overline{X}$ 为所有测量值的平均值，V^2 为测量数据的方差，S^2 为测量数据样本的标准偏差．则有

$$\overline{X} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} X_i, \qquad (12)$$

$$V^2=\sum_{i=1}^{N}X_i^2-NX^2,\quad (13)$$

$$S^2=V^2/(N-1).\quad (14)$$

如果样本数据划分为 m 组，对应第 l 组的统计参数为

$$\overline{X}_i=\frac{1}{m_i}\sum_{i=1}^{N}X_i,\quad (15)$$

$$V_i^2=\sum_{i=1}^{m_i}X_i^2-m_i\overline{X}_i^2,\quad (16)$$

$$S_i^2=V_i^2/(m_i-1).\quad (17)$$

对应 m 组的总方差为：$V_m^2=\sum_{i=1}^{m}V_i^2$ （18）

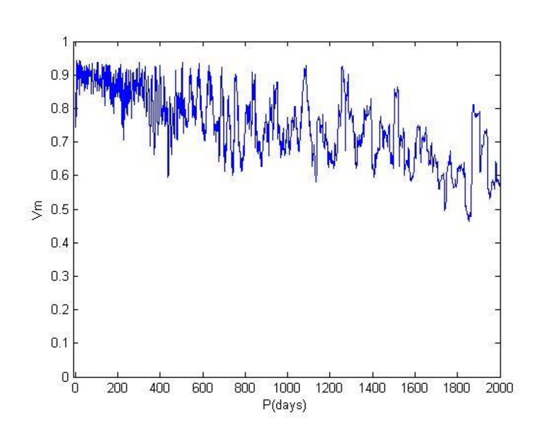


图 5 Jurkevich 方法分析 PKS 0735+178 B 波段光变周期

Fig.5 Jurkevich method analysis the variability period of PKS 0735+178 in B band

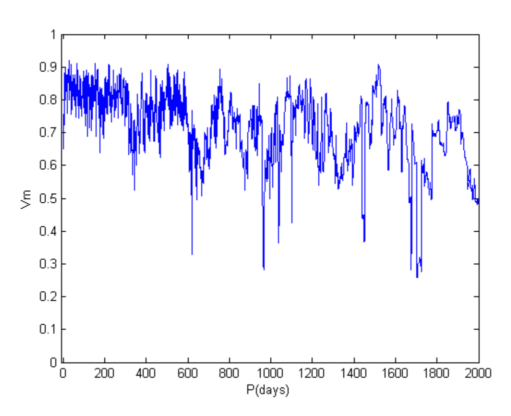


图 6 Jurkevich 方法分析 PKS 0735+178 V 波段光变周期

Fig.6 Jurkevich method analysis the variabilityperiod of PKS 0735+178 in V band

应用上述 Jurkevich 方法获得 PKS 0735+178 的 B 和 V 波段 $P-V_m$ 图，由图 5、图 6 可以看出，对应于 V_m 的最小值，B 波段存在 1.02 年、1.20 年、1.66 年、4.77 年的光变周期，V 波段周期存在 0.94 年、1.71 年、2.82 年、3.97 年的光变周期。根据光变周期存在的判据[20]，B 波段存在 1.02 年和 V 波段存在 0.94 年光变周期信息的可靠性最大，而 B 波段存在 4.77 和 V 波段存在 3.97 年次之。但考虑到平均时标为 (1.11 ± 0.01) 年的周期很可能是由于地球绕太阳所致，则 B 波段存在 4.77 年周期，V 波段存在 3.97 年周期。

2.3 离散相关分析法分析

离散相关分析法是用来分析两组离散数据相关性的方法之一[21-23]，文[24]用此方法分析 BL Lac 天体 PKS 0537-441 的光变特性[24]，该方法最大的特点是不需要对数据做任何处理，就能判断出两组数据的相关性。该方法的具体的步骤如下：

首先计算两组数据的离散相关函数值。如数组 a_i 和 b_i，则离散相关函数值为：

$$UDCF_{ij}=\frac{(a_i-\bar{a})(b_j-\bar{b})}{\delta_a\delta_b}.\quad(19)$$

$\bar{a}$ 和 $\bar{b}$ 分别为两组数据的平均值；$\delta_a\delta_b$ 分别为对应的标准偏差。

其次计算 DCF(τ)值。通过时间延迟 $\Delta t_{ij}=t_i-t_j$ 把两组数联系起来，假如时间延迟为τ，在区间 $\tau\pm\Delta\tau/2$ 中有M个 Δt_{ij}. 则 DCF(τ)值为

$$DCF(\tau)=\frac{1}{M}\sum UDCF_{ij}.\quad(20)$$

再次离散相关函数的误差为

$$\sigma DCF(\tau)=\frac{1}{M-1}\left\{\sum\left[UDCF_{ij}-DCF(\tau)\right]^2\right\}^{\frac{1}{2}}.\quad(21)$$

对于所得到的离散相关图，如果峰值在零的右面，表明数组 a_i 早于数组 b_i 的变化。反之，数组 a_i 就会迟于数组 b_i。

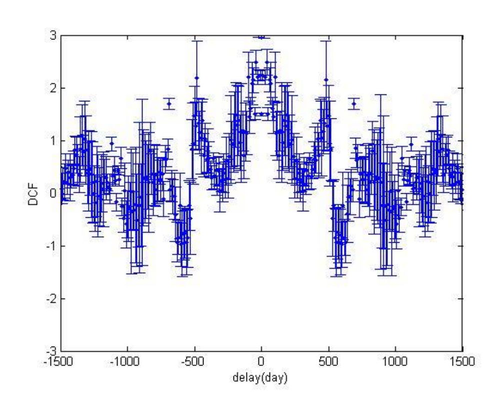


图 7 PKS 0735+178 在 B 波段的相关性分析

Fig.7 The correlation analysis of PKS 0735+178 in B band

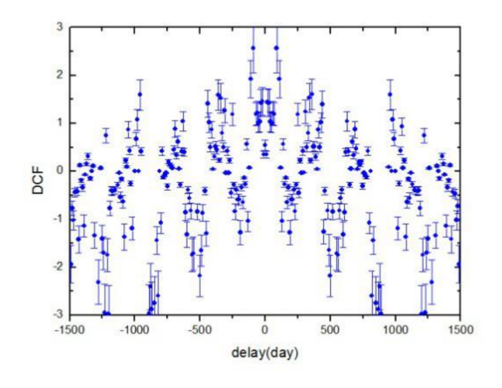


图 8 PKS 0735+178 在 V 波段的相关性分析

Fig.8 The correlation analysis of PKS 0735+178 in V band

通过使用离散相关函数对 PKS 0735+178 的 B 波段图像进行分析，所得结果如图 7、8，从图中得到 B 波段周期存在 1.21 年、 2.27 年、3.62 年、3.81 年的光变周期信息，V 波段存在周期 1.21 年、2.22 年、3.15 年、4.00 年的光变周期信息。根据离散相关示数分析周期的方法[21-23]，B 和 V 波段存在 1.21 年光变周期信息的可靠性最大, 而 B 波段存在 4.77 和 V 波段存在 3.97 年次之. 但考虑到平均时标为 (1.11 ± 0.01) 年的周期很可能是由于地球绕太阳所致, 则 PKS 0735+178B 波段的周期为 3.81 年，V 波段的周期为 4.00 年。

3 讨论与结论

本文主要收集了 PKS 0735+178 的光变数据，运用时间补偿离散傅里叶法变换、urkevich

方法和离散相关分析法 3 种方法分析 PKS 0735+178 的光变周期， 时间补偿离散傅里叶法变换法分析 B 波段得到的周期大致为$5.80\times10^{-4}(1/day)$，V 波段周期为$5.80\times10^{-4}(1/day)$；Jurkevich 方法分析得到 B 波段的周期大致为 1740 天，V 波段的周期大致为 1450 天；DCF 方法分析的得到 B 波段的周期大致为 1390 天，V 波段的周期大致为 1460 天. 由此可得出，BL Lac 天体 PKS 0735+178 的光变周期为$(4.33\pm0.41)yr$。这与文[25]和 文[11]用其他方法研究结果基本一致。根据周期分析获得的 PKS 0735+17 的周期$(4.33\pm0.41)yr$，我们利用薄吸积盘理论[3]来分析该蝎虎天体 PKS 0735+178 的中心黑洞质量和薄吸积盘的热不稳定性发生的区域。一般情况下，热有限循环周期性取决于粘滞度参数α，中心黑洞质量为$M_6=\frac{M}{10^6M_\odot}$和广义应力张量参数$\mu$，因此爆发时间为

$$t_{burst}=4.52\alpha_{0.1}^{-0.62}M_6^{1.37}yrs\text{，}\quad(22)$$

其中，α为粘滞系数；M_6以10^6倍太阳质量为单位；M为 PKS 0735+178 的中心黑洞质量。

由于目前吸积盘粘滞度的起源和特性都还不清楚，用磁流体力学对其讨论是一种常用的方法，文[26]提出如果磁场的逃逸率比较低，可以认为$\mu=0.5$，使用这个参数值，长周期爆发时间大约为$2t_{burst}$，即

$$t_{cyc}=9.04\alpha_{0.1}^{-0.62}M_6^{1.37}yrs\text{，}\quad(23)$$

对于 PKS 0735+178，如果$\alpha=0.1$，$\mu=0.5$，分析获得的周期是$(4.33\pm0.41)yr$，可以得出其中心黑洞质量为$M=0.22\times10^6M_\odot$，这个中心黑洞质量对于 PKS 0735+178 来说太小，由于利用薄吸积盘理论分析方法考虑黑洞的自旋，所以中心黑洞质量偏小，但蝎虎天体的观测特性表明，这类天体在光谱观测中无发射线[10]，作为深入研究该类天体给出了黑洞质量的下限也是有意义的，在今后的 CCD 测光观测中寻找短时标光变，从而获得中心黑洞质量，与之做进一步比较。

从图上也可看出不同的方法周期性的明显程度也不一样。时间补偿离散傅里叶变换法可以运用到天体数据处理上，可以有效地处理不均匀的天文数据，克服传统的傅里叶变换带来的伪周期，时间补偿离散傅里叶变换法通过施密特正交化，有效地解决由于1、$\cos\omega t$和$\sin\omega t$ 3 个向量不正交而带来伪信号的问题[27]。用离散相关性函数对 PKS 0735+178 天体的 B 波段和 V 波段相关性分析，从图中可以看出它们之间存在很强的相关性，表明它们之间的辐射起源是相似的[24]。

另外，在光变周期信息分析中，注意到(1.11 ± 0.01)年这个结果可能和一年的观测周期有关，这个周期可能是由于有规律的观测时间间隔导致的[28]，平均时标为(1.11 ± 0.01)年的周期很可能是由于地球绕太阳所致[29]。当然，也可能是天体 PKS 0735+178 的真实光变周期，

其他光变周期信息是这个周期的N 倍（N=1，2，3…）[30]。这个周期的研究[30]，对今后的观测有指导意义。将通过实测和更多的观测证明天体PKS 0735+178的光变周期。

参考文献：

[1]Dondi L, Ghisellini G. Gamma-ray-loud blazars and beaming[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1995, 273(3): 583-595.

[2]刘云，张雄，郑永刚，等. Blazar 天体的光变和偏振[J]. 物理学报, 2007, 56(9): 5558-5563.

Liu Yun, Zhang Xiong, Zheng Yonggang, et al. Polarization and variations of Blazar[J]. Acta Physica Sinica,2007, 56(9): 5558-5563.

[3]Zhang X, Xie G Z, Bai J M. A historical light curve of 3C 345 and its periodic analysis[J]. Astronomy and Astrophysics, 1998, 330: 469-473.

[4]Zhang X, Zheng Y G, Zhang H J, et al. CCD photometry and optical variability of the BL Lacertae object H0323+ 022[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2008, 174(1): 111-116.

[5] Zhang X, Zheng Y G, Zhang L, et al. Optical CCD photometry of the variability of the BL Lacertae object ON231 in a low state[J]. Publications of the Astronomical Society of Japan, 2008, 60(2): 145-160.

[6]Xie G Z, Bai J M, Zhang X, et al. The massive black hole in the center of the active galaxy MRK 421[J]. Astronomy and Astrophysics, 1998, 334: L29-L31.

[7] Zhang X, Zhao G, Zheng Y G, et al. CCD photometry and optical variability of gamma-ray-loud BL Lacertae object OJ 287 in a low, fainter state[J]. The Astronomical Journal, 2007, 133(5): 1995-2000.

[8] Carswell R F, Strittmatter P A, Williams R E, et al. Optical observations of the radio source 0735+ 178[J]. The Astrophysical Journal, 1974, 190: L101-L104.

[9] 丁世学，贺长剑. BL Lac 天体 PKS 0735+178 的光变周期分析[J]. 襄樊学院学报，2003, 24(2): 3-6.

Ding Shixue, He Changjian. The periodicity analysis of the light variability of BL Lacertae object PKS 0735+178 by using Jurkevich method[J].Journal of Xiang fan University, 2003, 24(2): 3-6.

[10]董云明. BL Lac 天体的辐射机制与分类[D]. 昆明：中国科学院国家天文台云南天文台, 2003.

[11] Webb J R, Smith A G, Leacock R J, et al. Optical observations of 22 violently variable extragalactic sources-1968-1986[J]. The Astronomical Journal, 1988, 95: 374-397.

[12] Pollock J T, Pica A J, Smith A G, et al. Long-term optical variations of 20 violently variable extragalactic radio sources[J]. The Astronomical Journal, 1979, 84: 1658-1676.

[13] Xie G Z, Li K H, Zhang Y H, et al. Simultaneous multi-range observations and detection of rapid variability of BL Lacertae objects [J]. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 1994, 106: 361-372.

[14] Xie G Z, Li K H, Zhang X, et al. Optical monitoring sample of the GeV gamma-ray-loud blazars[J]. The Astrophysical Journal, 1999, 522(2): 846-862.

[15] Bai J M, Xie G Z, Li K H, et al. Photometric monitoring of three BL Lacertae objects in 1993-1998[J]. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 1999, 136(3): 455-460.

[16] Schaefer B E. A search for rapid Variability in eight quasars and BL Lacertae objects [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1980, 92(547): 255-258.

[17] Qian B, Tao J. Optical monitoring of PKS 0735+178 from 1995 to 2001 and its historical periodic light curve[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2004, 116(816): 161-169.

[18] Zhang X, Zhang L, Zhao G, et al. Optical monitoring of three gamma-ray-loud BL Lacertae objects in 1999-2002[J]. The Astronomical Journal, 2004, 128(5): 1929-1941.

[19] 罗双玲，张雄，王文广. 时间补偿离散傅里叶变换分析 PKS 1510-089 红外光变周期[J].

云南师范大学学报：自然科学版, 2016, 36(5): 1-4.
Luo Shuangling, Zhang Xiong,Wang Wenguang. The optical variability periodicity analysis of PKS 1510-089 based on date compensated discrete fourier transform[J].Journal of Yunnan Normal University: Natural Sciences Edition, 2016, 36(5): 1-4.
[20] Jurkevich I. A method of computing periods of cyclic phenomena[J]. Astrophysics and Space Science, 1971, 13(1): 154-167.
[21] 高蓉，杨金雪，李怀珍. BL Lac 天体 PKS2155-304 光变特性分析[J]. 云南师范大学学报：自然科学版, 2015, 35(1): 1-4.
Gao Rong, Yang Jinxue, Li Huaizhen. The variability analysis of BL Lac objects PKS 2155-304[J]. Journal of Yunnan Normal University: Natural Sciences Edition, 2015, 35(1): 1-4.
[22] Edelson R A, Krolik J H. The discrete correlation function-a new method for analyzing unevenly sampled variability data[J]. The Astrophysical Journal, 1988, 333: 646-659.
[23] Hufnagel B R, Bregman J N. Optical and radio variability in blazars[J]. The Astrophysical Journal, 1992, 386: 473-484.
[24] 王文广，张皓晶，王雪品，等. BL Lac 天体 PKS 0537-441 的光变特性分析[J]. 云南师范大学学报：自然科学版, 2016, 36(4): 1-7.
Wang Wenguang, Zhang Haojing, Wang Xuepin, et al. The variability analysis of BL Lac objects PKS 0537-441[J]. Journal of Yunnan Normal University: Natural Sciences Edition,2016, 36(4): 1-7.
[25] Smith P S, Balonek T J, Elston R, et al. Optical and near-infrared observations of BL Lacertae objects and active quasars[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 1987, 64: 459-485.
[26]Horiuchi T, Kato S. A model of hydromagnetic turbulent viscosity in radiation-pressure-dominated disks[J]. Publications of the Astronomical Society of Japan, 1990, 42(5): 661-674.
[27]李娟. Blazar 光变研究[D]. 广州：广州大学, 2007.
[28]Kidger M, Takalo L, Sillanpaa A. A new analysis of the 11-year period in OJ287-Confirmation of its existence[J]. Astronomy and Astrophysics, 1992, 264: 32-36.
[29]Liu F K, Xie G Z, Bai J M. A historical light curve of ON 231 and its periodic analysis[J]. Astronomy and Astrophysics, 1995, 295: 1-10.
[30]Fan J H, Xie G Z, Lin R G, et al. The long-term variability of BL Lac object PKS 0735+ 178[J]. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 1997, 125(3): 525-528.

The Variability Analysis of PKS 0735+178

Yu Lian，Zhang Xiong，Wang Wen-guang，LuoShuang-ling
(College of Physics and Electronics，Yunnan Normal University，Kunming 650500，China，Email: ynzx@yeah.net)

Abstract: In this paper, we used the time compensation discrete Fourier transform method and discrete correlation analysis (DCDFT), Jurkevich ,DCF model to analyses B band and V band periodicity of the PKS 0735 + 178, based on a large amount of data we have collected. We found that the variability period is about (4.33 ± 0.41) years and the lower limits of the central black hole mass is $0.22 \times 10^{6} M_{\odot}$.

Keywords: PKS 0735 + 178; DCDFT method; Jurkevich method; DCF model method; Variability; Black hole mass